

На правах рукописи



СКОСАРЬ ЕКАТЕРИНА ОЛЕГОВНА

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ
И НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ПРОКАТКЕ
ДЛИННОМЕРНЫХ РЕЛЬСОВ**

Специальность 05.16.05 – Обработка металлов давлением

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина».

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
Шилов Владислав Александрович.

Официальные оппоненты: - Готлиб Борис Михайлович,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Уральский государственный
университет путей сообщения»,
заведующий кафедрой мехатроники;
- Митрофанов Андрей Анатольевич
кандидат технических наук,
ОАО «ЕВРАЗ НТМК», начальник управления
технического контроля производства железнодо-
рожного проката.

Ведущая организация - ОАО «Уральский институт металлов».

Защита состоится 15 марта 2013 г. в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.285.04 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 28, корп. 3, ауд. Мт-329. Тел: (343) 375-45-74, факс: (343) 374-53-35, E-mail: omd@mtf.ustu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина».

Автореферат разослан «12» февраля 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Мальцева Л.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одной из важных государственных задач в настоящее время является повышение эксплуатационного ресурса и качества железнодорожных рельсов. Отечественные рельсы, выпускаемые Нижнетагильским и Новокузнецким металлургическими комбинатами по своим эксплуатационным свойствам значительно уступают лучшим зарубежным аналогам (рельсам Японии, Франции, США, Австрии и др. производителей) и не удовлетворяют постоянно возрастающим современным требованиям грузовых и пассажирских перевозок. Открытым акционерным обществом «Российские железные дороги» поставлена задача к 2030г увеличить объем грузовых перевозок в 1,7 раза (до уровня 2,4 млрд.т в год), повысить ресурс рельсов на прямых участках путей до 1500-2500 млн.т груза брутто (вместо 600-800 млн.т брутто в настоящее время), увеличить маршрутные скорости движения пассажирских поездов на высокоскоростных магистралях до 250-350 км/ч, перейти на использование рельсов длиной до 100м (вместо 25м в настоящее время) с целью уменьшения количества сварных швов на железнодорожном полотне.

Получить рельсы, удовлетворяющие указанным требованиям, на действующих линейных рельсобалочных станах ОАО «НТМК» и ОАО «НКМК» практически невозможно. В передовых зарубежных странах (Япония, США, Австрия, Китай и др.) для производства высококачественных длинномерных рельсов применяют современные рельсобалочные станы, снабженные непрерывно-реверсивными группами универсальных четырехвалковых и вспомогательных двухвалковых клетей, а также устройствами для термоупрочнения рельсового раската. С учетом этих тенденций первый в России такой стан сооружается в настоящее время на Челябинском металлургическом комбинате, производится реконструкция рельсобалочного стана ОАО «НКМК» (г. Новокузнецк). В предпусковом периоде этих станов целесообразно провести научный анализ и обоснование рациональной технологии производства длинномерных рельсов.

Согласно техническим требованиям (ГОСТ Р51685-2000, Еuronормы EN 13674-1:2003, стандарты США AREMA-2003, Канады CN12-16С, Индии T12-96, КНР ТВ/Т 2344-2003 и др. стандарты) длинномерные рельсы должны иметь высокую прямолинейность, высокую и стабильную по длине точность размеров профиля и равномерные механические свойства по длине рельса. Указанные качества существенно зависят от распределения температуры в поперечных сечениях и по длине раската в чистовом проходе, а также от режима охлаждения раската при термообработке. Неравномерность распределения температуры по

элементам рельсового профиля (головке, шейке, подошве) и по длине полосы вызывает соответствующую неравномерность напряжений в названных участках раската, и при охлаждении его происходит искривление и коробление (отклонение от прямолинейности) закаленного рельса. В то же время в литературе практически отсутствуют достоверные сведения о распределении температуры по элементам рельсового раската: практически все известные исследования процессов прокатки в универсальных калибрах выполнены в изотермических условиях.

Изложенное выше позволило сформулировать **цель диссертационного исследования**: определить закономерности изменения температурных полей и напряженного состояния металла при прокатке длинномерных рельсов на современном рельсобалочном стане и разработать научно обоснованные технические решения по повышению прямолинейности закаленных рельсов.

Работа проводилась в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» по государственному контракту № 02.740.11.0152 «Разработка комплексной металлургической технологии производства высококачественных стальных изделий массового назначения» (шифр 2009-1.1233-032-00 7).

Научную новизну работы представляют следующие разработки:

- методика моделирования методом конечных элементов в программном комплексе «DEFORM-3D» температурных полей и напряженного состояния металла при прокатке длинномерных рельсов;
- закономерности изменения температуры и интенсивности напряжений по длине и в поперечных сечениях раската при прокатке рельсов на универсальном рельсобалочном стане;
- математическая модель температурного состояния чистового рельсового раската перед термообработкой, позволяющая определять режимы охлаждения рельса при термоупрочнении;
- упрощенный аналитический метод расчета температурных полей при прокатке рельсов, позволяющий с минимальными затратами времени достоверно определять распределение температуры по элементам раската;
- научные объяснения причин нарушения прямолинейности рельсов при прокатке и термообработке.

Практическую значимость работы представляют следующие результаты диссертации:

- алгоритмы расчета инженерным методом распределения температуры по длине и поперечным сечениям раската;

— соображения о целесообразности применения на универсальном рельсобалочном стане отдельно стоящей калибрующей клетки, удаленной от непрерывно-реверсивной группы тандем на расстоянии более длины предчистового раската;

— научно обоснованные рекомендации по выбору способа и устройства для термообработки длинномерных рельсов в условиях современного универсального рельсобалочного стана;

— техническое решение по совершенствованию способов охлаждения чистового рельсового раската при термообработке с целью повышения прямолинейности длинномерных рельсов.

Достоверность полученных выводов и положений диссертации основывается на применении фундаментальных положений теории сортовой прокатки, опыте развития рельсопрокатного производства, использовании классического метода конечных элементов и современных программных средств (*DEFORM-3D*, *SolidWorks*, *MathCAD*) и подтверждается проверкой в условиях действующего рельсобалочного стана.

В целом разработанные положения и полученные результаты диссертации направлены на совершенствование рельсопрокатного производства с целью повышения качества и прямолинейности длинномерных рельсов.

Результаты диссертационной работы использованы в ОАО институт «УралНИИАС» при разработке проекта реконструкции прокатного цеха №3 Челябинского металлургического комбината с установкой универсального рельсобалочного стана по контракту № RMCGL101 – DE - 05.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах: IX международная научно-техническая конференция «Современные металлические материалы и технологии» (СММТ'11). СПбГПУ: – г. Санкт-Петербург, 2011. Пятый международный научно-практический семинар «Уральская научно-педагогическая школа по обработке металлов давлением им. А.Ф. Головина. Модернизация и инновации в металлургии и машиностроении»: – г. Екатеринбург, 2011. Шестая международная молодежная научно-практическая конференция «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении. Уральская научно-педагогическая школа имени профессора А.Ф. Головина»: – г. Екатеринбург, 2012.

Публикации. Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 7-и печатных трудах, в том числе в 3-х рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и изложена на 117 страницах машинописного текста, включая 28 рисунков, 5 таблиц, 2 приложения и библиографический список из 117 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертации и дана общая характеристика работы.

В **первой главе** представлен аналитический обзор по теме диссертации. Показано, что в мировой практике для производства высококачественных длинномерных рельсов применяют современные рельсобалочные станы, снабженные непрерывно-реверсивными группами универсальных клетей и специальными устройствами для термоупрочнения чистового раската. Сформировался типовой по составу оборудования универсальный рельсобалочный стан. В России первые станы такого типа сооружаются в настоящее время на Челябинском и Новокузнецком металлургических комбинатах.

Для обеспечения требуемых эксплуатационных свойств длинномерные рельсы, полученные на таких станах, должны иметь высокую и стабильную по длине точность размеров и механических свойств, а также минимальные отклонения от прямолинейности. Особенно важное значение имеет прямолинейность рельсов для высокоскоростного движения (до 350 км/ч). Указанные показатели существенно зависят от температурных режимов прокатки и технологии термообработки рельсов. В обзоре выполнен анализ влияния этих факторов на качественные показатели рельсов.

Наблюдаемая на практике неравномерность температуры по элементам рельсового профиля в поперечных сечениях и по длине раската приводит к скручиванию и отклонению от прямолинейности рельса. Поэтому при разработке технологии производства рельсов необходимо правильно рассчитать температуру элементов профиля и управлять температурным режимом прокатки и охлаждения рельсов.

Известные формулы расчета температуры (А.П. Чекмарева, П.И. Полухина, М.А. Зайкова, А.Г. Стукача, Г.П. Иванцова и др.) при прокатке фасонных, в т.ч. рельсовых профилей, позволяют определять среднюю по профилю температуру металла в каждом проходе и не позволяют рассчитывать температуру в характерных точках (областях) очага деформации, т.е. рассчитать температурные поля в поперечных сечениях по длине раската.

Вопросам расчета температурных полей в задачах обработки металлов давлением посвящены работы Г.П. Иванцова, Н.Ю. Тайца, А.А. Каракиной, В.И. Тарновского, Н.И. Ялового, А.Ф. Рыжова, М. А. Тылкина, П.И. Полухина,

А.В. Лыкова, А.Д. Томленова, М.А. Михеева и др. ученых. Большинство авторов используют аналитический метод теории теплопроводности. Однако применение этого метода ограничено относительно простыми задачами прокатки в гладких валках и не позволяет получить решения задачи для сложной формы очага деформации рельса с учетом неравномерного распределения деформации по длине и по сечению раската. Более эффективно использовать вариационные или конечно-разностные методы, одним из которых является наиболее распространенный в последнее время *метод конечных элементов (МКЭ)*. Развитию этого метода посвящены работы О. Зенкевича, А.И. Вальтера, Н.Б. Дорохина, Л.А. Розина, Е.М. Морозова, Р. Галлагера, Г. Стренга, Ш. Кобаяши. На основе использования МКЭ в настоящее время разработано большинство вычислительных инженерных программных комплексов: *DEFORM-3D*, *FORGE*, *Super Form*, *QForm-3D* и др. При пользовании этими комплексами инженер задает конечно-элементную сетку и форму элементов, чаще всего используются элементы треугольной и тетраэдрической формы. При расчете программа выбирает среднее значение температуры из каждого элемента сетки и таким образом простираивается температурное поле всей деформируемой области. В таком виде МКЭ широко используется в научно-исследовательских и проектных работах при анализе температурных полей и НДС металла в процессахковки, штамповки, прокатки. С применением программного комплекса *DEFORM-3D* в УГТУ - УПИ было проведено исследование процессов прокатки рельсов в универсальных калибрах: установлены закономерности входа раската в калибр, определено деформированное и напряженное состояние металла в очаге деформации, рассчитаны силы, действующие на горизонтальные и вертикальные валки. Установлено, что наиболее рациональный режим деформации реализуется при одинаковых коэффициентах вытяжки по шейке, головке и подошве профиля. Разработана методика расчета калибровки валков с применением универсальных калибров. Однако все эти исследования выполнены при изотермических условиях прокатки, без учета неравномерности распределения температуры по элементам рельсового профиля и по длине раската, а следовательно, не могут быть применены для управления прямолинейностью рельсов.

Высокие механические свойства и прямолинейность рельсов зависят в значительной степени от технологии термической обработки, включающей закалку с прокатного или отдельного нагрева и отпуск, с получением тонкопластинчатой перлитной структуры. В настоящее время известно достаточно большое разнообразие способов и устройств для термоупрочнения рельсов от поверхностной закалки головки с прокатного нагрева до объемной закалки все-

го тела рельса с повторного нагрева и с применением различных охлаждающих сред (вода, водовоздушная смесь, сжатый воздух, масло, раствор полимеров и др.), подаваемых на рельс различными способами (соплами, спреерами, форсунками, погружением в ванны и т.п.). В диссертации представлен подробный анализ известных способов и устройств. Показано, что на универсальных рельсобалочных станах нового типа применяют в основном термоупрочнение рельсов с прокатного нагрева с дифференцированной подачей охлаждающей среды на различные участки (элементы) профиля.

Установлено, что влияние рассмотренных способов и устройств на качественные показатели рельсовой продукции различны. Однако, как показывает практический опыт, для всех способов термообработки рельсов характерным недостатком является искривление и коробление (отклонение от прямолинейности) закаленного рельса, причем степень этого отклонения от прямолинейности увеличивается с увеличением длины рельса. Это осложняет последующую правку и отделку рельсов, особенно длинномерных. Причиной такого отклонения от прямолинейности являются неравномерные остаточные напряжения в элементах профиля закаленного рельса, что в свою очередь является следствием неравномерности распределения температуры по элементам профиля в поперечных сечениях и по длине рельсового раската после прокатки. Поэтому залогом обеспечения прямолинейности рельса при его термической обработке является обеспечение равномерности охлаждения головки и подошвы, которое определяется температурным полем раската перед охлаждением (т.е. после прокатки), а также способом и параметрами подачи охлаждающей среды на закаливаемый рельс.

Исследованию новой технологии прокатки рельсов с применением универсальных клеток посвящено ограниченное количество работ, большинство из которых относится к изучению закономерностей деформации металла и разработке методики расчета калибровок прокатных валков. До настоящего времени в литературе не опубликовано сведений о температурном и напряженном состоянии металла при прокатке фасонных профилей, в т.ч. длинномерных рельсов, что имеет существенное значение для определения режимов термической обработки длинномерных рельсов.

В аналитическом обзоре показано, что в настоящее время наиболее эффективным методом исследования технологии прокатки и термообработки рельсов является моделирование на ЭВМ с применением программного комплекса *DEFORM-3D* и *SolidWorks*.

По результатам проведенного аналитического обзора сформулирована

цель и определены **задачи диссертационной работы**:

— разработать методику конечно-элементного моделирования температурных полей и напряженного состояния металла при прокатке рельсов на универсальном рельсобалочном стане с использованием программного комплекса «*DEFORM-3D*»;

— провести по разработанной методике компьютерные расчеты температурных режимов прокатки рельса Р65 с определением для каждого прохода температурных полей в поперечных сечениях раската и по длине полосы, установить закономерности изменения температуры по длине в каждом элементе рельсового профиля (головке, шейке и подошве);

— с учетом полученных результатов моделирования обосновать выбор наиболее рационального способа термообработки (охлаждения) рельса, обеспечивающего получение минимального отклонения от прямолинейности;

— разработать упрощенный метод расчета температурных полей, позволяющий получать информацию в реальном масштабе времени при оперативном решении задач управления технологическим процессом;

— провести проверку результатов расчета температурных полей в условиях действующего стана;

— разработать мероприятия по совершенствованию способов охлаждения рельсов при термообработке с целью повышения прямолинейности.

Во второй главе представлена методика и результаты моделирования температурных полей и напряженного состояния металла при прокатке длиномерных рельсов в программном комплексе «*DEFORM-3D*». Для моделирования был выбран универсальный рельсобалочный стан, включающий наиболее полный состав прокатного оборудования (рис. 1), и калибровка валков для прокатки рельса Р65, разработанная кафедрой ОМД УрФУ (см. кн. «Калибровка прокатных валков»/В.К. Смирнов, В.А. Шилов, Ю.В. Инатович. М.:2010, с. 387).

Методика решения термонапряженной задачи при прокатке рельсов методом конечных элементов с применением современных программных средств (*DEFORM-3D*) включает следующие основные этапы:

1. Построение твердотельных моделей всех калибров, валков и заготовки в программе SolidWorks.
2. Создание в библиотеке материала рельсовой стали, соответствующей требованиям физикомеханических свойств.
3. Задание исходных данных и граничных условий для численного ком-

пьютерного моделирования МКЭ в *DEFORM-3D*.*

4. Проведение расчета в основном программном модуле *DEFORM-3D*.*

5. Отображение, обработка и анализ температурных полей в поперечных сечениях и по длине рельсового раската в каждом проходе.

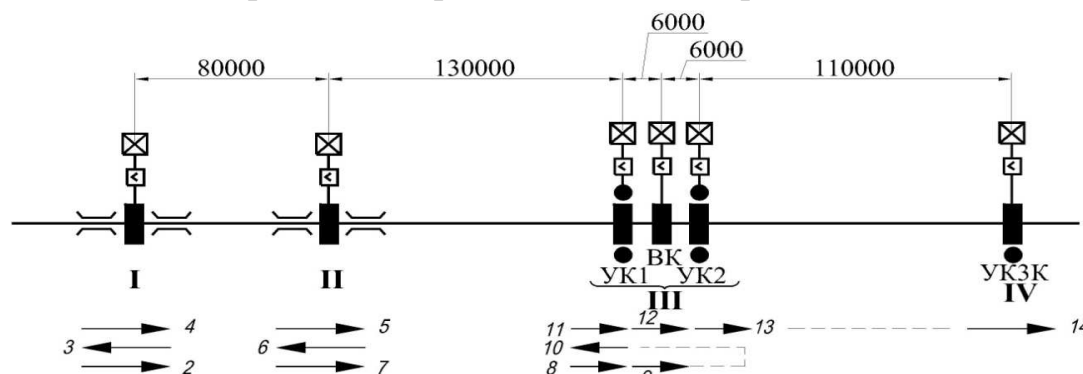


Рис. 1. Схема расположения клеток и распределение проходов на универсальном рельсобалочном стане: I - обжимная реверсивная клетка; II - черновая реверсивная клетка; III - непрерывно - реверсивная группа клеток; IV - универсальная калибрующая клетка. Стрелками с цифрами показано направление прокатки в проходах

По разработанной методике проведено компьютерное моделирование прокатки рельса Р65. Полагали, что металл обладает свойствами жестко-пластической среды, начальную температуру заготовки принимали равной 1200°C. Для создания новой базы материала сопротивление деформации рельсовой стали рассчитывали по формуле, полученной В.К. Смирновым и А.Р. Бондиным при диапазоне температур $t=700-1300^{\circ}\text{C}$. Условия контактного взаимодействия принимали по Кулону с коэффициентом трения 0,7. Коэффициент теплопередачи между объектами во время деформации $k=5\text{Н/сек/мм/}^{\circ}\text{C}$, во время перехода от одного калибра к другому $k=1\text{Н/сек/мм/}^{\circ}\text{C}$. Угловые скорости вращения прокатных валков задавали в соответствии с расчетным скоростным режимом.

При моделировании условий входа раската в универсальный калибр методом интерференции определяли контактные точки (чаще всего две или одну) рельсового раската (заготовки) относительно одного из прокатных валков. Движение раската к валкам обеспечивает рольганг, который при решении задачи заменен прямоугольным толкателем. Заведомо линейная скорость толкателя меньше скорости валков. Поэтому после захвата раската валками толкатель теряет контактную поверхность с заготовкой с последующим удалением его на

* Разрешение на пробное использование лицензионного пакета программы Deform-3D предоставлено официальным представителем компании SFTC в России ООО «Артех» www.artech-eng.ru (ключ защиты SFTC #7791, срок лицензии: 21.03.2012-20.05.2012г).

определенном этапе моделирования. В результате моделирования прокатки рельсового раската применяли проводки, которые позволяют устранить изгиб полосы. Для нахождения напряженного состояния использовали метод объединенного градиента, при котором НДС многократно аппроксимируется для нахождения решения, меньше затрачивается времени, т.к. задача решения системы конечных элементов упрощается. А методом для нахождения температуры - прямой метод разрежения, который обеспечивает обязательную точность и сходимости решения. Моделирование проводили на современном компьютере с процессором Intel Core номер i5-2320 и тактовой частотой 3.00 GHz, оперативной памятью 8 ГБ и 64-разрядной операционной системой. Время моделирования одного прохода составляет примерно - 7 часов.

По результатам моделирования получены цветовые эпюры распределения температуры и интенсивности напряжений в поперечных сечениях рельсового раската для каждого прохода по переднему и заднему концу, а также по середине раската. На рис. 2 такие эпюры представлены для 5-го (разрезного) калибра и чистового 14-го прохода. Под каждой эпюрой приведены рассчитанные среднемассовые значения параметров. В прямоугольных рамках выделены средние значения параметров по элементам рельсового профиля: головке, шейке и подошве. Числа на поле эпюр указывают средние значения параметров в отдельных цветовых областях. Полученные эпюры свидетельствуют о значительной неоднородности термонапряженного состояния металла, степень неоднородности которого увеличивается по ходу прокатки.

Полученные по эпюрам расчетные значения параметров позволили сделать выводы о закономерностях изменения температуры и интенсивности напряжений по длине и в поперечных сечениях раскатов, о степени неоднородности температурного поля.

Графики на рис. 3 характеризуют закономерность изменения температуры по длине раската. Как видно, снижение температуры при прокатке в реверсивных клетях дуо 1000 и 900 незначительно, а перепад температуры между передним и задним концом раската изменяется от 5-7°C до 15°C. Такую неравномерность изменения температуры по длине раската при средней температуре металла 1100-1150°C можно считать незначительной и полагать, что при реверсировании раската температура является практически постоянной по всей длине полосы, что объясняется чередованием концов раската при задаче в валки. После того, как чередование концов полосы при задаче в валки закончилось, перепад температуры по длине раската увеличивается до 25-30°C и становится почти одинаковым. Наибольший перепад температуры по длине достигается в

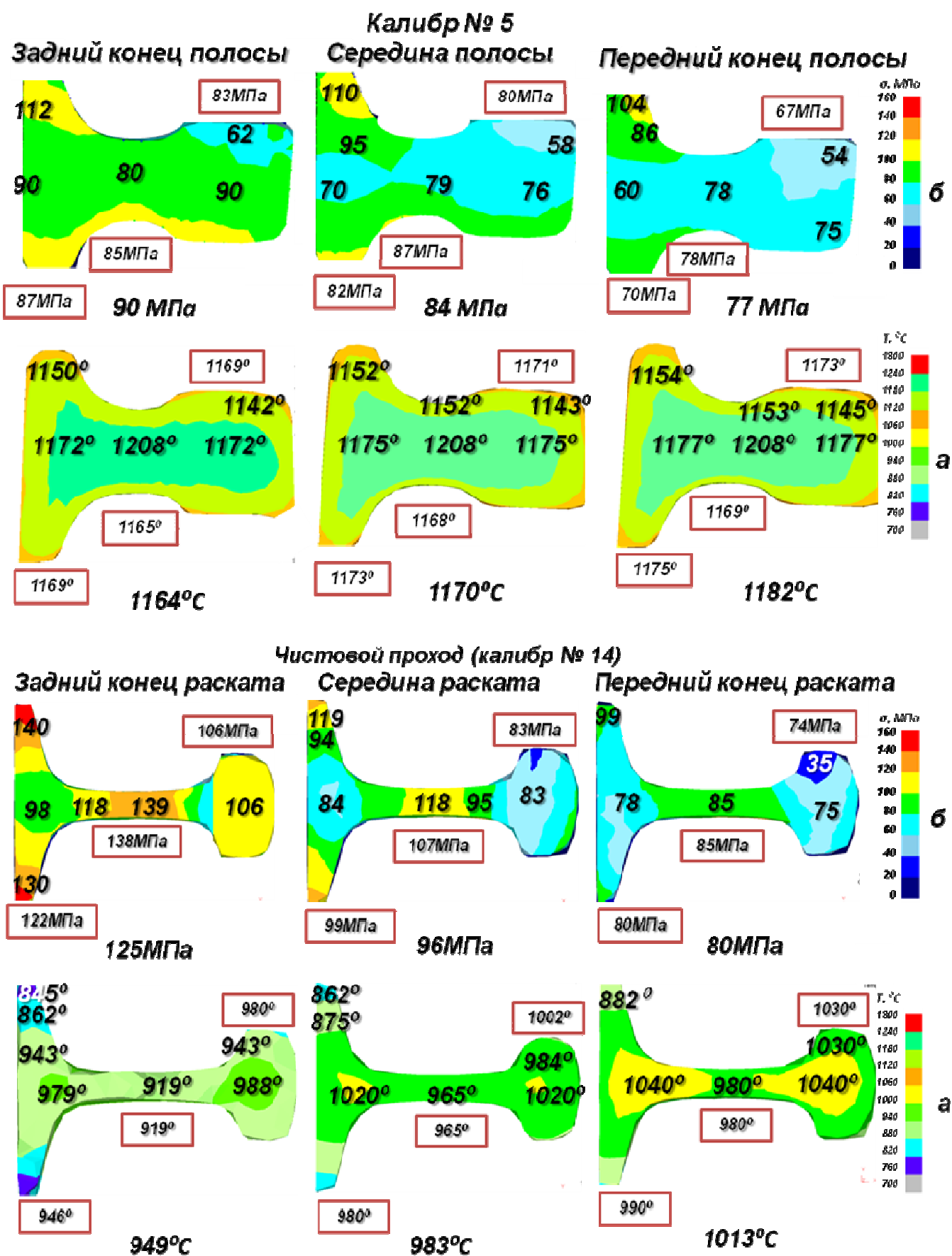


Рис. 2. Температурные поля (а) и интенсивность напряжений (б) в поперечных сечениях раската из разрезного и чистового калибра

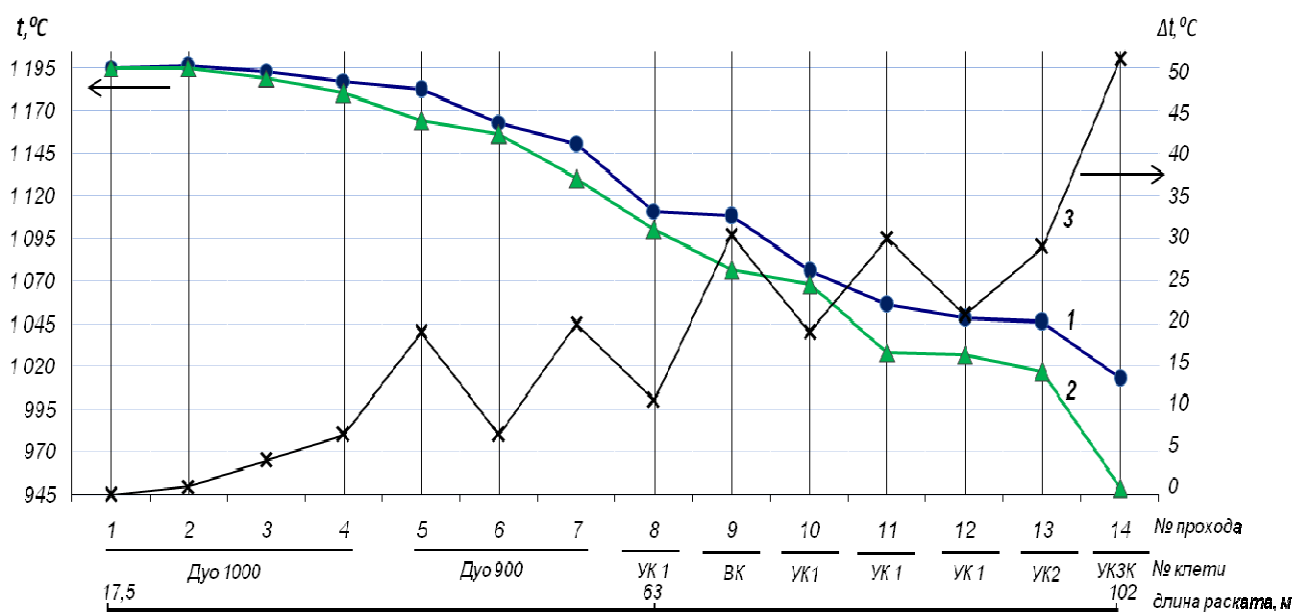


Рис. 3. Изменения средней температуры рельсового раската в процессе прокатки рельса Р65 на универсальном рельсобалочном стане: 1 — передний конец раската; 2 — задний конец раската; 3 — перепад температуры по длине раската

последнем, калибрующем проходе (до 64°C), что объясняется удалением калибрующей клетки от группы тандем на расстояние, большее длины раската. Это потребует соответствующего режима охлаждения чистового раската при термообработке с целью получения одинаковых механических свойств по длине рельса. Поэтому с точки зрения температурного режима прокатки рельсов применение отдельно стоящей калибрующей клетки УКЗ является нецелесообразным.

Распределение температуры в поперечных сечениях раската характеризуется весьма существенной неравномерностью, которую оценивали по разнице температуры в отдельных точках каждого сечения $\Delta t_{max} = t_{max} - t_{min}$ (где t_{max} — и t_{min} — максимальная и минимальная температура в точках одного сечения). Указанная величина Δt_{max} увеличивается по ходу прокатки от 60-65° в разрезном калибре до 158°C в чистовом, калибрующем проходе (рис. 4).

Изменение по проходам температурного поля элементов профиля в поперечных сечениях передней, средней и задней частях раската носит одинаковый характер и различается только количественными показателями (рис. 5).

Наиболее низкую температуру, как правило, имеет шейка профиля, причем наиболее интенсивное охлаждение ее наблюдается при прокатке в непрерывно-ревесивной группе тандем (клетки УК1-УК2) и особенно в калибрующей клетки УКЗК. Неравномерность температурного поля элементов рельсового профиля Δt увеличивается по ходу прокатки от 5-7°C в клетки дуо 900 до 35°C на переднем конце и до 45-60°C на заднем конце раската.

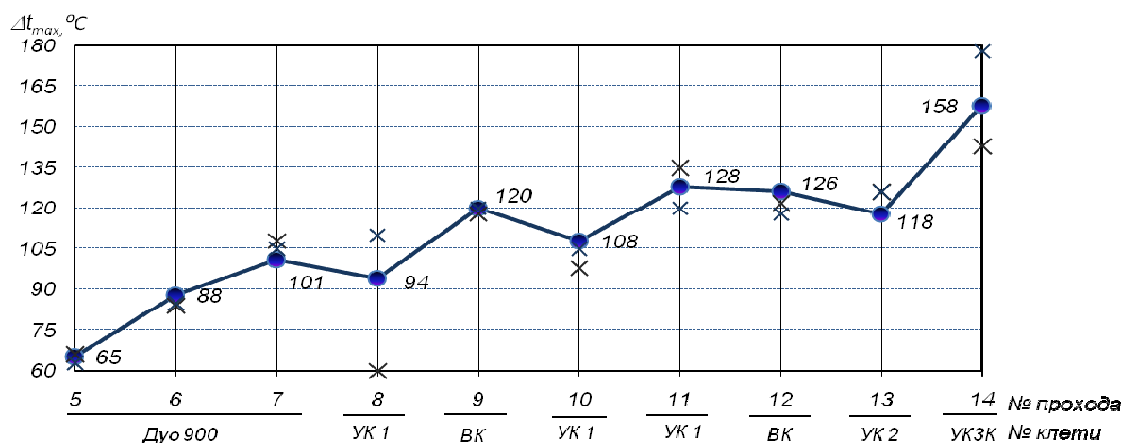
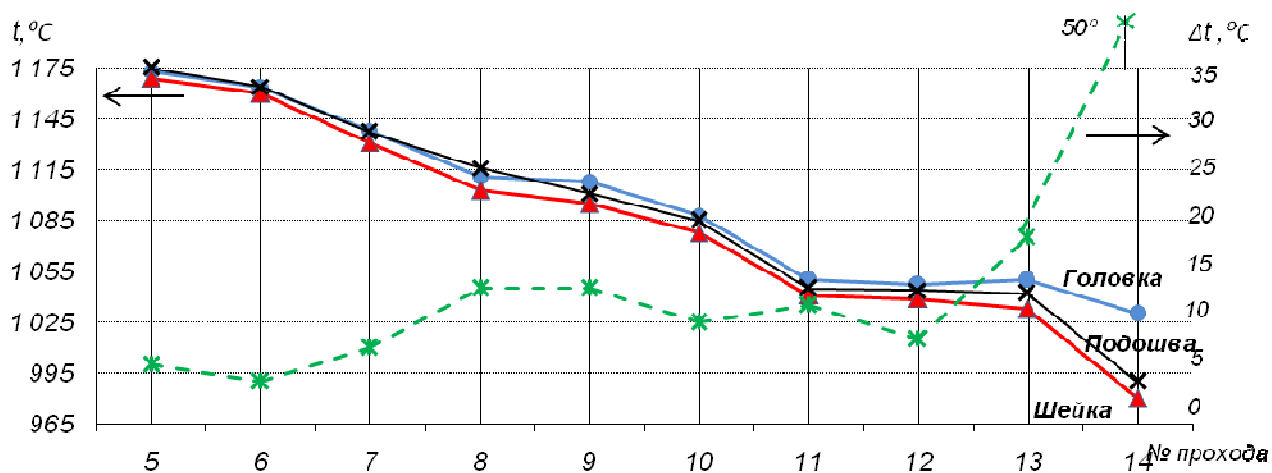


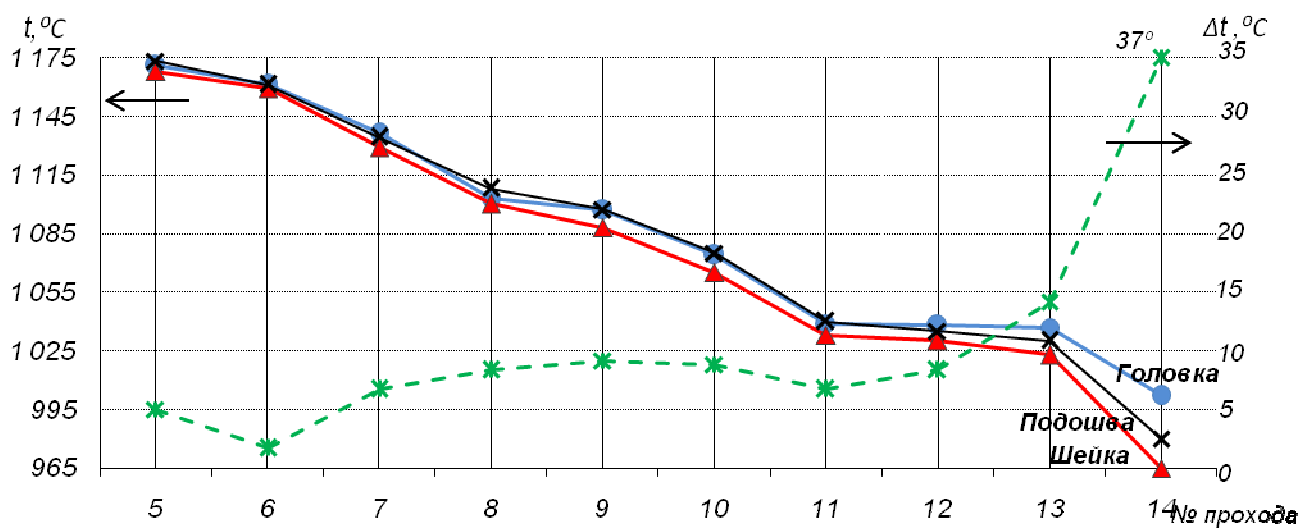
Рис. 4. Общая оценка неравномерности температурного поля поперечного сечения раскатов

Сравнивая температурные поля элементов профиля в клетях УК2 и УК3К, можно сделать вывод, что прокатка без калибрующей клетки может повысить равномерность распределения температуры элементов чистового профиля примерно до 20°C , что имеет важное значение для последующего охлаждения (термообработки) готового раската с целью получения равномерных по длине механических свойств и повышения прямолинейности рельса.

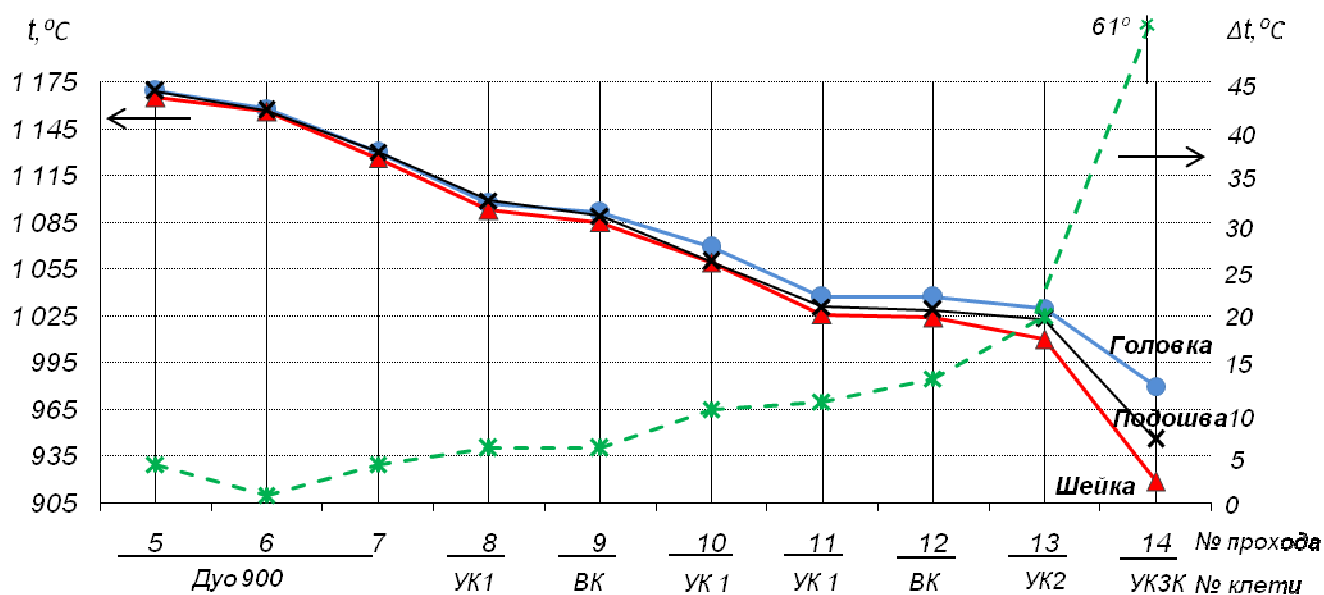
С учетом неоднородности температурных полей рассчитано распределение интенсивности напряжений элементов рельсового раската в поперечных сечениях раската (рис. 6). Интенсивность напряжений достигает наибольших значений в универсальных клетях, где имеют место наибольшие деформации по шейке и фланцам, причем напряжение заднего конца раската всегда выше переднего. Во вспомогательных клетях интенсивность напряжений, как правило, мала, поскольку там обжимаются только фланцы по высоте. Наибольшие напряжения, как правило, испытывает шейка профиля, а наименьшие – головка. Неравномерность интенсивности напряжений $\Delta\sigma$ характеризуется разностью напряжений шейки $\sigma_{ш}$ и головки σ_2 : $\Delta\sigma = \sigma_{ш} - \sigma_2$, или шейки $\sigma_{ш}$ и подошвы σ_n : $\Delta\sigma = \sigma_{ш} - \sigma_n$. Неоднородность температурных полей и соответствующая неравномерность распределения интенсивности напряжений по элементам раската создает возможность продольного изгиба и скручивания раската вокруг его продольной оси, т.е. отклонения от прямолинейности рельса. Для снижения указанных отклонений от прямолинейности рельсов целесообразно применять дифференцированное охлаждение раската водо-воздушным или воздушно-капельным способом с подачей охлаждающей среды в количестве, соответствующем температуре каждого элемента профиля.



а



б



в

Рис. 5. Изменение средней температуры элементов рельсового профиля в поперечных сечениях передней (а), средней (б) и задней (в) частях раската

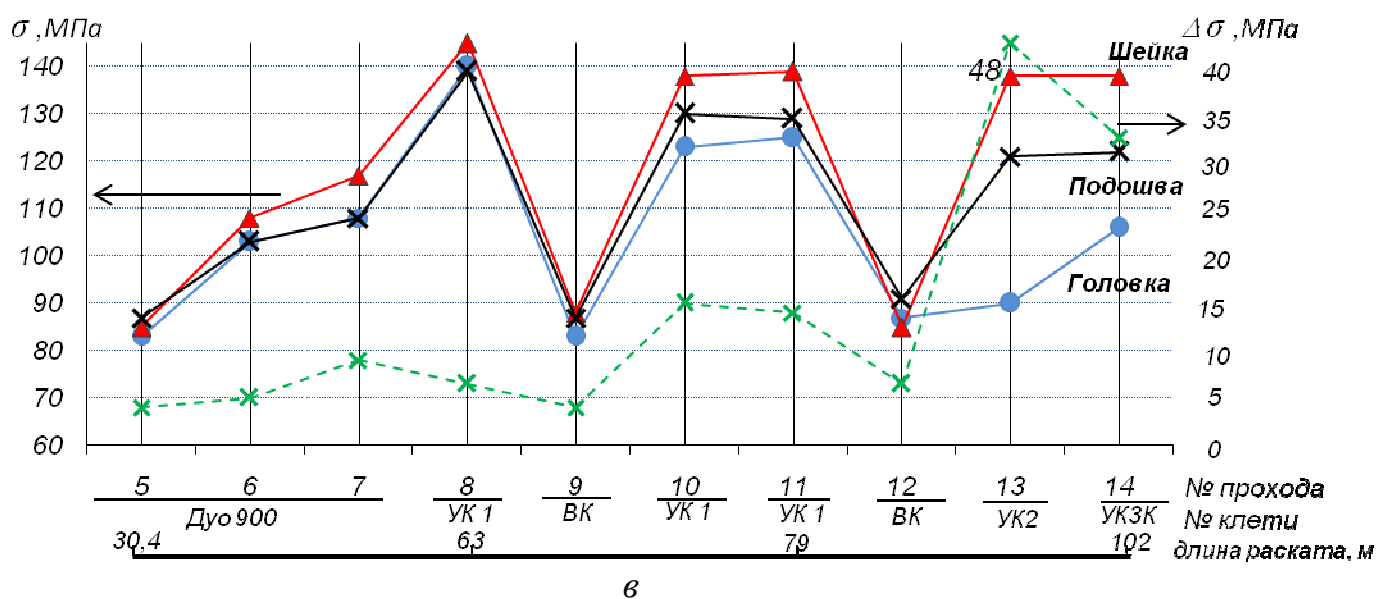
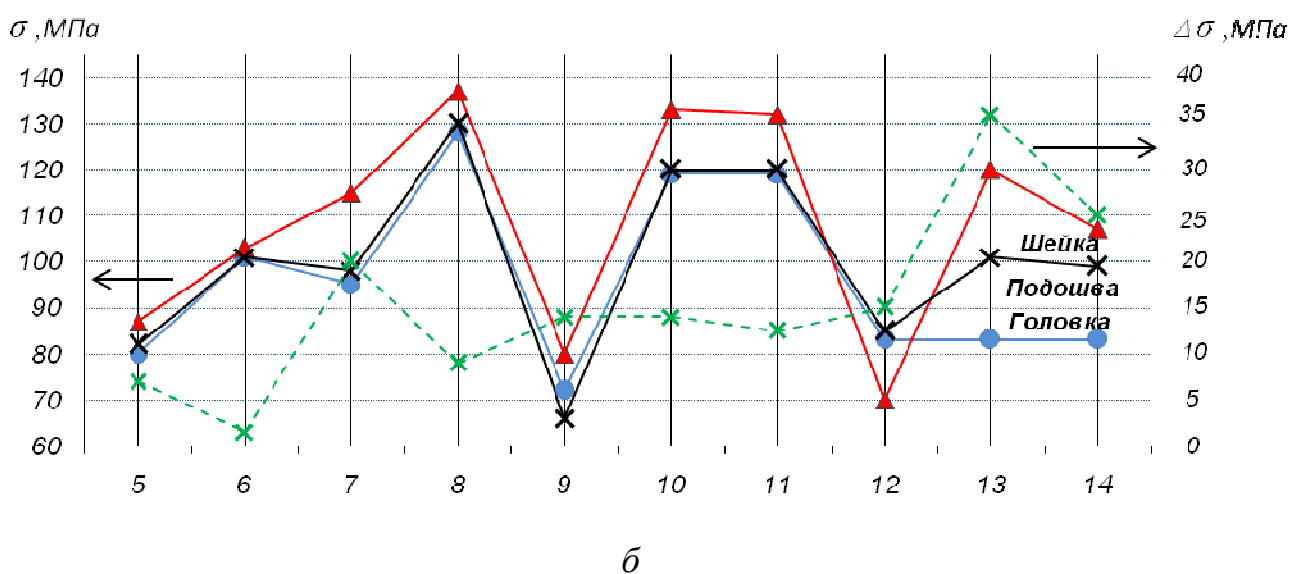
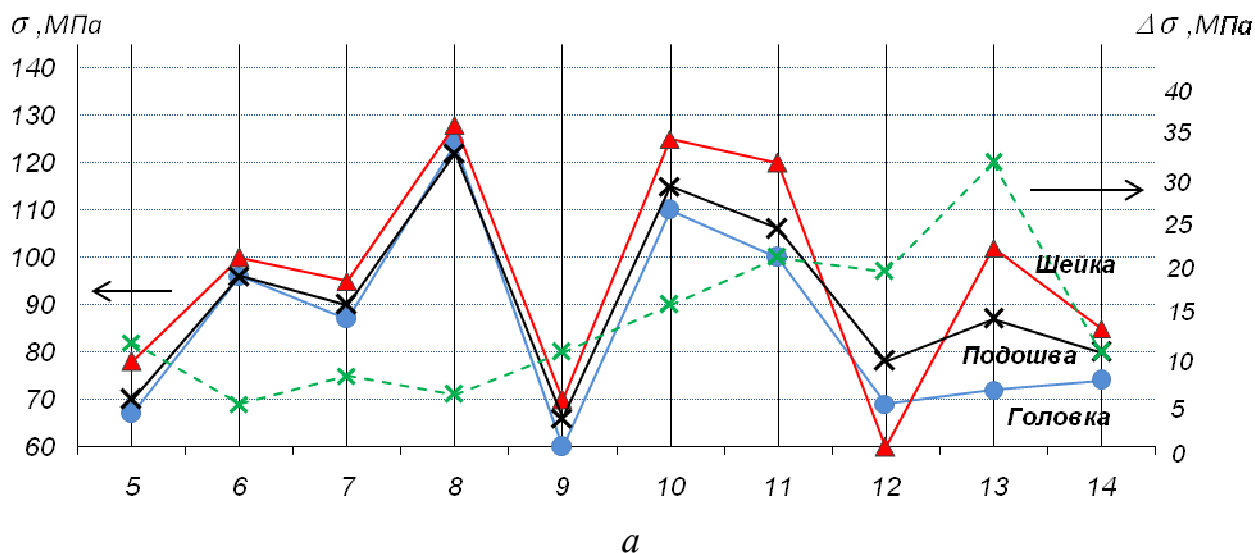


Рис. 6. Изменение интенсивности напряжений в элементах рельсового профиля в процессе прокатки передней (а), средней (б) и задней (в) частях раската

По результатам исследования разработана математическая модель температурного состояния чистового раската, позволяющая рассчитывать температуру любого элемента профиля рельса по длине раската с целью управления режимами термообработки длиномерного рельса. На рис. 7 представлено изменение температуры каждого элемента рельса по длине раската (от начала $l=0$, середины $l=51$ м и до конца $l=102$ м). Для получения обобщенной формулы указанные данные привели к безразмерному виду в координатах:

$$\tilde{t} = f(m),$$

где $\tilde{t} = \frac{t}{t_n}$ - приведенная температура раската (по переднему концу $\tilde{t}_{ni} = \frac{t_{ni}}{t_{ni}} = 1$; по средней части $\tilde{t}_{ci} = \frac{t_{ci}}{t_{ni}}$ и по заднему концу $\tilde{t}_{zi} = \frac{t_{zi}}{t_{ni}}$);

l – переменная, обозначающая головку, шейку и подошву профиля;

$m = \frac{l}{l_k}$ - приведенная длина раската, $0 \leq m \leq 1$; l и l_k - текущая и конечная длина раската, $l_k = 102$ м.

Аппроксимируя полученные исходные данные квадратным многочленом, получили следующие уравнения для распределения температуры каждого элемента рельса по длине чистового раската перед термообработкой:

$$\left. \begin{aligned} - \text{для головки} \quad \tilde{t}_T &= 1 - 0,0603m + 0,0118m^2 \\ - \text{для шейки} \quad \tilde{t}_{ш} &= 1 + 0,001m - 0,0632m^2 \\ - \text{для подошвы} \quad \tilde{t}_п &= 1 + 0,004m - 0,0484m^2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

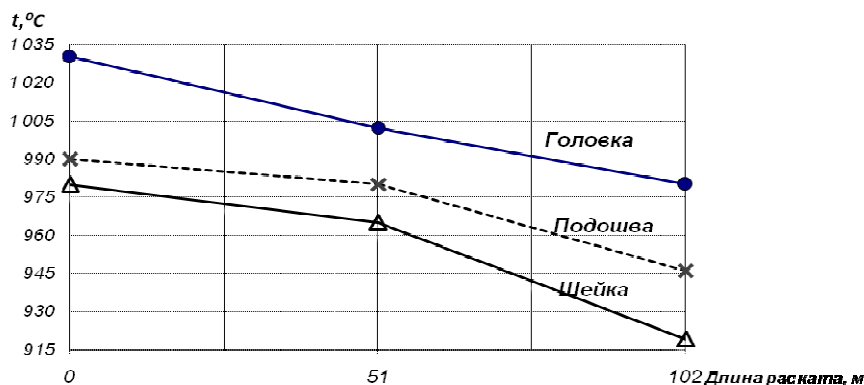


Рис. 7. Изменение средней температуры элементов профиля по длине чистового раската (по результатам расчетов МКЭ)

Моделирование процессов прокатки в программном комплексе *DEFORM-3D* требует больших затрат машинного времени: даже при подготовленных исходных данных расчета по определению термонапряженного состояния металла при прокатке одного профиля на рельсобалочном стане требуют более 100 часов машинного времени. Это исключает возможность применения комплекса *DEFORM-3D* для оперативных расчетов и использования в системах автоматизированного управления технологическими процессами.

В третьей главе разработан аналитический (инженерный) метод расчета температурных полей при прокатке рельсов, позволяющий приближенно решать температурные задачи при значительно меньших затратах времени по сравнению с моделированием в системе «*DEFORM-3D*». Для этого известную формулу А.И. Целикова, учитывающую потери тепла за счет лучеиспускания и разогрев металла от деформации, адаптировали применительно к условиям прокатки фасонных профилей, имеющих несколько элементов ($i=1,2,3...n$). Получили следующие выражения для определения снижения температуры Δt_i за один проход по каждому элементу профиля:

$$\Delta t_i = t_{oi} - \frac{1000}{\sqrt[3]{\frac{0,0255 P_i \tau_i}{\omega_i} + \left(\frac{1000}{t_{oi} + \Delta t_{di} + 273} \right)^3}} + 273, \quad (2)$$

где t_{oi} - температура элемента раската перед входом в рассматриваемый калибр, °С; P_i и ω_i - периметр и площадь поперечного сечения элемента раската после прохода, мм, мм²; τ_i - время охлаждения раската при перемещении от рассматриваемого калибра к следующему калибру, с; Δt_{di} - повышение температуры элемента раската в рассматриваемом калибре, °С.

$$\Delta t_{di} = 0,183 \sigma \ln \lambda, \quad (3)$$

где σ - сопротивление металла пластической деформации, МПа; λ - коэффициент вытяжки элемента профиля. Для расчета сопротивления деформации рельсовой стали по элементам профиля использовали формулу В.К. Смирнова - А.Р. Бондина. С учетом рассчитанного по формуле (2) снижения температуры Δt_i определяют среднюю температуру каждого элемента профиля после прохода по формуле:

$$t_{li} = t_{oi} - \Delta t_i \quad (4)$$

Применение предложенной методики расчета температурных полей основано на допущениях:

- каждый элемент фасонного профиля деформируется и охлаждается как отдельное тело;
- расчетная температура каждого элемента является постоянной (средней) по сечению.

Эти допущения в какой-то мере снижают точность определения температуры металла в элементах профиля рельса, но не влияют на качественные закономерности изменения температурных полей в процессе прокатки, что подтверждено экспериментально.

Расчеты проводят для каждого прохода в следующем порядке:

1. Разделяют поперечное сечение (профиль) раската на отдельные элементы (фланцы, головка, шейка и т.п.).

2. Для каждого элемента профиля рассчитывают: геометрические параметры деформации Π, ω, λ ; сопротивление металла деформации σ ; разогрев металла за счет пластической деформации Δt_d ; затраты времени на перемещение поперечного сечения от предыдущего калибра к рассматриваемому τ ; снижение температуры при прокатке выделенного элемента профиля Δt_i ; температуру элемента профиля после прокатки $t_{1i} = t_{oi} - \Delta t_i$.

3. По результатам расчетов строят эпюру распределения температуры t_{1i} в поперечном сечении профиля.

По составленному алгоритму разработана программа расчета температурных полей при прокатке рельсов в программе *MathCad*. При подготовленной исходной информации время расчета по разработанной программе составляет не более 1 мин.

Выполнена проверка достоверности разработанного аналитического метода в условиях действующего рельсобалочного стана 800 ОАО «НТМК» с оценкой сходимости расчетных и опытных (производственных) данных по температурным режимам прокатки. Получены эпюры распределения температуры по элементам в поперечных сечениях раската в каждом проходе (рис. 8) и кривая изменения средней температуры по длине раската (рис. 9). Сравнение расчетных и опытных данных (табл. 1) свидетельствует о достаточной для практики точности предложенного инженерного метода расчета температуры.

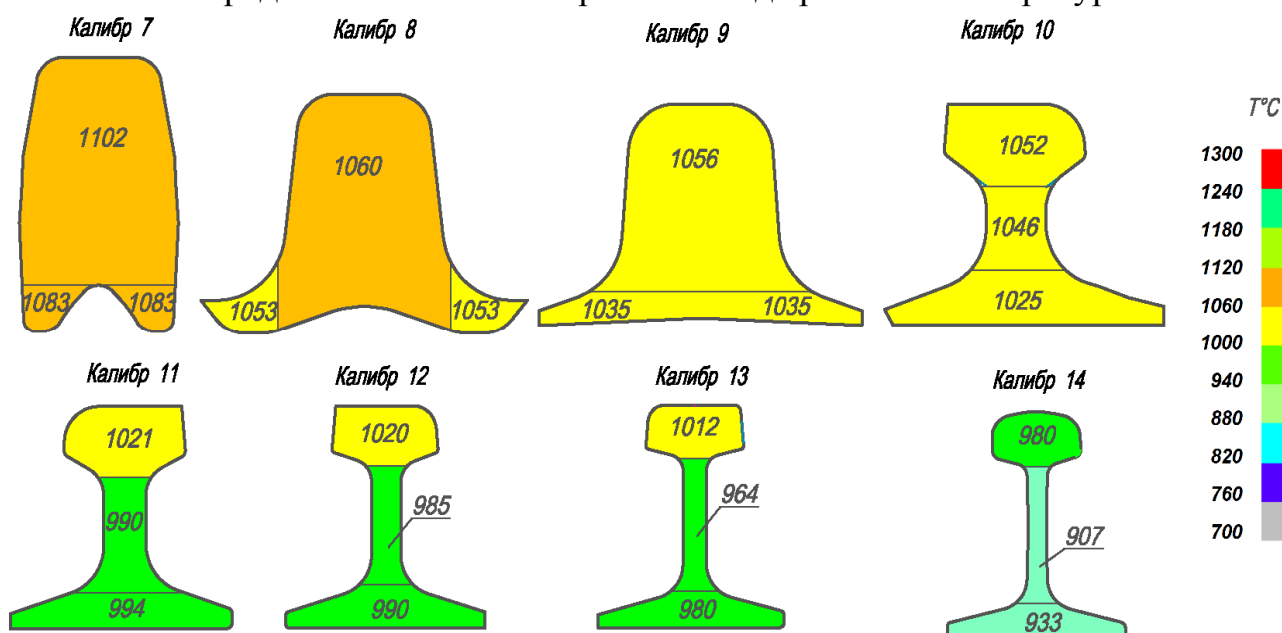


Рис. 8. Температурные поля в поперечных сечениях рельсового раската из калибров 7-14

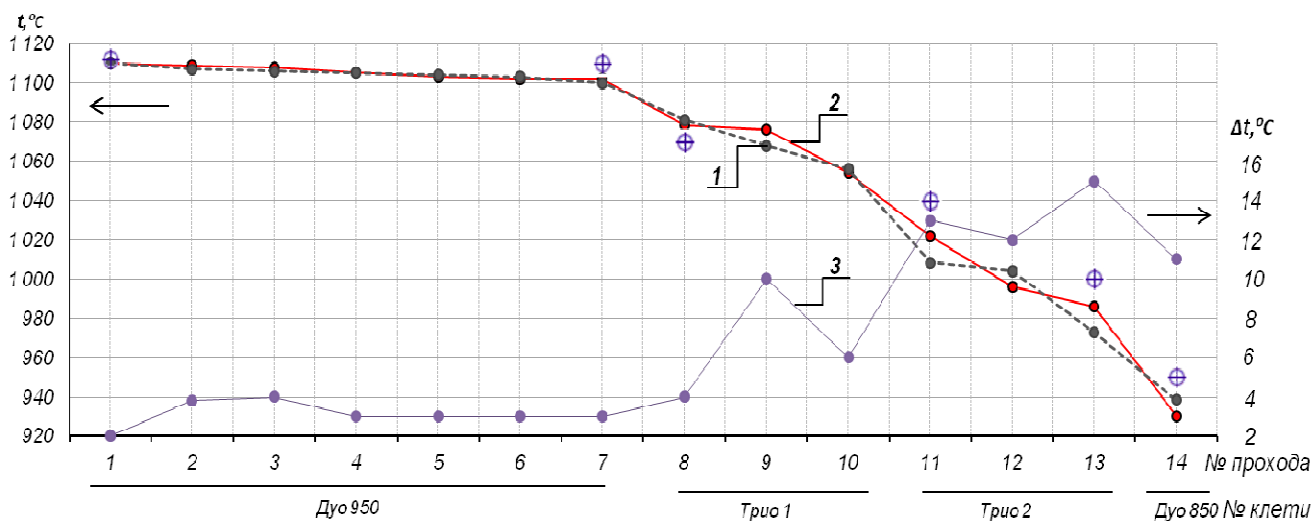


Рис. 9. Изменения температуры рельсового раската в процессе прокатки рельса Р65 на линейном рельсобалочном стане 800: 1 – передний конец раската; 2 – задний конец раската; 3 – перепад температуры по длине раската. Точками показаны результаты экспериментальных измерений температуры в отдельных участках стана

Таблица 1

Сравнение расчетных и опытных данных по температуре рельсового раската на стане 800.

	Номер прохода					
	1	7	8	11	13	14
Средняя расчетная температура, °C	1110	1106	1079	1020	980	934
Опытная температура, °C	1112	1110	1070	1040	1000	950
Расхождения $\Delta t_{ср}$, °C	2	4	9	20	20	16

Для определения степени адекватности разработанного аналитического метода и методики моделирования температурных полей в системе *DEFORM-3D*, проведен расчет температурных режимов прокатки длиномерного рельса Р65 на универсальном рельсобалочном стане при тех же условиях, что и при расчетах в системе *DEFORM-3D* (см. выше).

На рис. 10 приведен расчетный график изменения температуры раската по клетям стана. Сделаны следующие выводы:

- закономерность изменения температуры раската по клетям стана при расчете по обоим методам имеет одинаковый характер;
- конечная температура прокатки в обоих случаях расчета получается достаточно близкой: 949-1013°С – при моделировании в *DEFORM-3D* и 954-1015°С – при расчете аналитическим методом;
- перепад температуры по длине полосы в обоих случаях увеличивается по ходу прокатки от 1-7°С в первых проходах до 50-64°С в последних проходах.

Установлено, что расчетные температуры по двум рассматриваемым методам (табл. 2) различаются на 1-30°С в зависимости от номера прохода, при-

чем аналитический метод дает, как правило, завышенные значения температуры: в среднем на 9°С по переднему концу и на 10°С по заднему концу раската. Указанные расхождения (погрешности определения) температуры являются приемлемыми для прокатки.

Таким образом, инженерный метод позволяет определять основные закономерности распределения температуры по длине и поперечным сечениям раската, совпадающие с достаточной точностью с результатами моделирования в программном комплексе «*DEFORM-3D*».

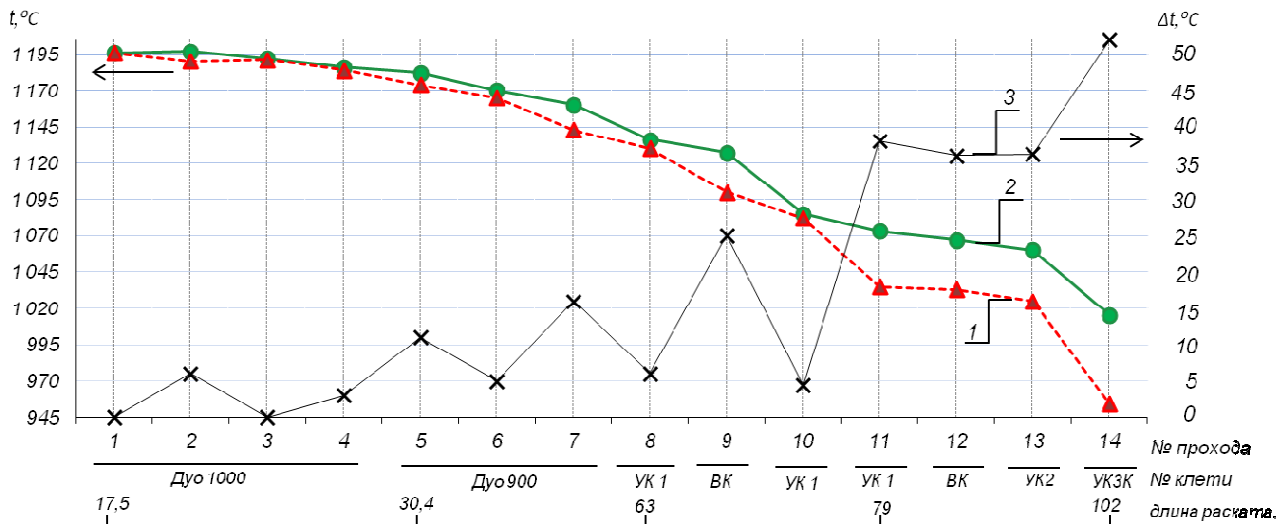


Рис. 10. Изменения температуры рельсового раската в процессе прокатки на универсальном рельсобалочном стане (результаты расчета аналитическим методом): 1 – передний конец раската; 2 – задний конец раската; 3 – перепад температуры по длине раската

Таблица 2

Сравнение температуры раската при расчете аналитическим методом и методом конечных элементов в *Deform-3D*

№ Клетки	№ Про- хода	Передний конец			Задний конец			Неравномерность, перепад по длине $\Delta t = t_n - t_z$	
		DEFORM-3D	Аналити- ческий метод	Расхож- дения Δt °C	DEFORM-3D	Аналити- ческий метод	Расхож- дения Δt °C	DEFORM-3D	Аналити- ческий метод
Дуо I	1	1196	1197	1	1196	1196	5	1	7
	2	1196	1197	1	1195	1190	5	1	7
	3	1193	1192	1	1189	1191	2	4	1
	4	1187	1186	1	1180	1184	4	7	2
Дуо II	5	1182	1182	0	1164	1174	10	18	8
	6	1163	1170	7	1156	1165	9	7	5
	7	1150	1160	10	1130	1143	13	20	17
УК1	8	1111	1136	25	1100	1130	30	11	6
ВК	9	1108	1127	19	1077	1100	23	31	27
УК1	10	1076	1085	9	1068	1082	14	8	3
	11	1056	1073	17	1028	1035	7	28	38
ВК	12	1048	1067	19	1027	1033	6	21	34
УК2	13	1046	1060	14	1017	1025	8	29	35
УК3К	14	1013	1015	2	949	954	5	64	61

В четвертой главе изложены рекомендации по использованию результатов исследований.

Выбран способ и устройство для дифференцированной термообработки длинномерных рельсов с прокатного нагрева. На разработанное техническое решение подана заявка на изобретение со следующей формулой: Способ термической обработки рельсов с прокатного нагрева, включающий загрузку рельса в охлаждающее устройство, фиксацию его головкой вниз или вверх и дифференцированное охлаждение элементов рельсового профиля, *отличающийся тем*, что перед охлаждением концы рельса закрепляют от поперечного перемещения в клещевых зажимах и растягивают рельс в продольном направлении с напряжениями, составляющими 0,7-0,9 предела текучести рельсовой стали при температуре конца прокатки. Предложенное техническое решение позволяет повысить прямолинейность горячекатаных рельсов за счет выравнивания напряжений в поперечных сечениях чистового раската.

Рассмотренное техническое решение может быть использовано в любом способе дифференцированной закалки рельсов.

Высказаны рекомендации по рациональному использованию разработанных методов расчетов в инженерной практике и учебном процессе студентов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненной диссертационной работы достигнута поставленная цель и получены следующие результаты:

1. Разработана методика численного моделирования температурных полей и напряженного состояния металла при прокатке длинномерных рельсов в программном комплексе «*DEFORM-3D*». По разработанной методике получены эпюры распределения температуры и интенсивности напряжений в поперечных сечениях по длине раската в каждом проходе при прокатке рельса Р65 на современном рельсобалочном стане, включающем непрерывно-реверсивную группу тандем универсальных клетей и отдельно стоящую чистовую калибрующую универсальную клеть.

2. Определены закономерности изменения температуры металла по длине раската: реверсивная прокатка в черновых клетях способствует относительному выравниванию температуры по длине за счет чередования концов полосы по задаче в валки; при непрерывной прокатке в группе тандем происходит увеличение температурного перепада между передним и задним концом раската до 40°C, а на чистовом раскате (за калибрующей клетью) наблюдается интенсивный рост неравномерности температуры по длине до 64°C, что способствует ухудшению прямолинейности рельса и снижению равномерности механических свойств.

3. Установлено, что температурные поля в поперечных сечениях раската характеризуются весьма существенной неравномерностью, которая зависит от формы калибра. В среднем по сечению наиболее низкую температуру имеет шейка рельсового профиля, а наиболее высокую температуру – головка. Разница температур головки и шейки в поперечных сечениях передней, средней и задней частях раската увеличивается по ходу прокатки от 5-7°С в черновой клети дуо до максимальной 45-60°С в калибрующей клети. Это приводит к искривлению рельса относительно его продольной оси.

4. Показано, что применение на рельсобалочном стане отдельно стоящей калибрующей клети, удаленной от группы тандем на расстоянии более длины предчистового раската, является нецелесообразным, так как приводит к увеличению неравномерности температуры по длине и поперечному сечению раската и способствует снижению прямолинейности рельса.

5. Установлено, что напряженное состояние металла в процессе прокатки характеризуется значительной неравномерностью, как по длине, так и по поперечным сечениям рельсового раската. Под действием указанной неравномерности напряжений создается возможность продольного изгиба и скручивания раската вокруг его продольной оси, что приводит к отклонению рельса от прямолинейности при термообработке.

6. Разработана математическая модель температурного состояния чистового рельсового раската перед термообработкой, позволяющая оперативно рассчитывать температуру любого элемента рельса по длине раската с целью управления режимом термообработки длинномерного рельса.

7. Разработан упрощенный аналитический метод расчета температурных полей при прокатке рельсов, позволяющий оперативно (в масштабе реального времени) достоверно определить основные закономерности распределения температуры по длине и поперечным сечениям рельсового раската на линейных и универсальных рельсобалочных станах.

8. Проведена экспериментальная проверка результатов расчета по разработанным методам в условиях действующего рельсобалочного стана. Показано, что моделирование в программном комплексе «*DEFORM-3D*» и аналитический метод позволяют рассчитывать температурные поля с достаточной для практики точностью.

9. Разработаны научно обоснованные рекомендации по выбору способа и устройства для термообработки длинномерных рельсов в условиях современного универсального рельсобалочного стана.

10. Предложено на уровне изобретений техническое решение по совершенствованию способов охлаждения чистового рельсового раската при термообработке с целью повышения прямолинейности закаленных длинномерных

рельсов.

11. Материалы диссертационной работы были использованы при разработке проекта реконструкции прокатного цеха №3 с установкой универсального рельсобалочного стана ОАО «ЧМК».

Таким образом, в диссертации решена актуальная научно-техническая задача определения температурных полей и напряженного состояния металла при прокатке длинномерных железнодорожных рельсов, что имеет существенное значение для повышения их качества и развития рельсопрокатного производства.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах.

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК:

1. Зяблицева (Скосарь) Е.О., Литвинов Р.А., Шилов В.А. Моделирование температурных полей при прокатке рельсов // Известия вузов. Черная металлургия. 2011. № 5. С. 51-53.

2. Скосарь Е.О., Шилов В.А., Шварц Д.Л. Исследование температурных условий прокатки длинномерных рельсов на универсальном рельсобалочном стане // Производство проката. 2012. №11. С. 7-11.

3. Скосарь Е.О., Шилов В.А. Температурное и напряженно-деформированное состояние металла при прокатке рельсов // Изв. вузов. Черная металлургия. 2012. №11. С. 63-64.

В сборниках трудов научных конференций:

4. Зяблицева (Скосарь) Е.О., Литвинов Р.А., Шилов В.А. Моделирование температурных полей при прокатке рельсов // Современные металлические материалы и технологии (СММТ'11). Труды международной научно-технической конференции. СПб: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2011. С 30-32.

5. Скосарь Е.О., Шилов В.А. Моделирование температурных условий прокатки длинномерных рельсов на универсальном рельсобалочном стане // Материалы 6-й международной молодежной научно-практической конференции «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении. Уральская научно-педагогическая школа имени профессора А.Ф. Головина». Екатеринбург, 2012. С. 645-649.

6. Зяблицева (Скосарь) Е.О., Литвинов Р.А., Шилов В.А. Моделирование температурных полей при прокатке рельсов // Сайт компании ООО «Инжиниринговая компания ARTEX». <http://www.artech-eng.ru>.

7. Скосарь Е.О., Шилов В.А. Исследование температурных условий прокатки длинномерных рельсов на универсальном рельсобалочном стане // Сайт компании ООО «Инжиниринговая компания АРТЕХ». <http://www.artech-eng.ru>.

Подписано в печать 22.02.13.

Формат 60x84 1/16

Бумага писчая

Плоская печать

Тираж 100 экз.

Заказ №

Ризография НИЧ УрФУ, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19